

## 산업용 하이브리드 네트워크를 위한 실시간 동기화 방법에 대한 연구

정지원, 이정일, 김동성

국립금오공과대학교 전자공학부 네트워크 기반 시스템 연구실

### Time synchronization method for industrial hybrid network

Ji-won Jung, Jung-il Lee, Dong-sung Kim

Networked System Lab., School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**Abstract** - 본 논문에서는 산업용 유무선 공유 네트워크의 게이트웨이를 통한 망 구성에서 발생하는 시간 동기화 문제에 대해 분석했다. 이를 통해 적용 가능한 실시간 동기화 알고리즘을 제안했다. 또한 제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해 기존의 동기화 알고리즘과 비교하고, 모의실험을 통해 각각의 장단점을 분석하고, 그 효율성을 검증하였다.

#### 1. 서 론

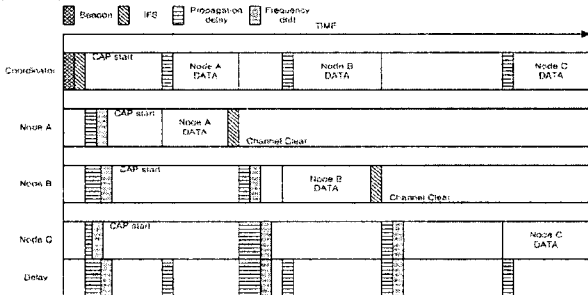
산업용 환경에서 무선제어기술을 적용하기 위하여 기존의 유선 필드버스에 무선 제어망을 연결하려는 연구가 시도되고 있다[1]. 이러한 이종 네트워크를 제어하기 위해서는 유무선 게이트웨이를 이용할 수 있다. 유무선 게이트웨이는 이종 네트워크를 연결하여 무선과 유선의 분산 시스템 구조를 형성한다. 이러한 유무선 분산 시스템에서의 실시간성을 보장하기 위해서는 기존의 동기화 알고리즘에 추가적인 기법을 고려해야한다. 여러 가지 형태의 분산 시스템 구조에서 하나의 노드가 잘못된 센싱 시각을 가지게 되면 연결된 타 노드들은 그 값을 그대로 사용하게 되어 문제가 발생한다. 또한, 채널 접근을 위한 경쟁기간에서 서로 다른 시간으로 시작하게 되어 채널 대역폭이 감소한다[2]. 이러한 동기화 문제들을 해결하기 위해서는 실시간 동기화 알고리즘을 사용하지만, 이종의 네트워크가 공존하게 되면 서로간의 적용 알고리즘이 다르기 때문에 정확한 동기화가 어렵다. 그러므로 이종의 네트워크 간에 동기화 데이터 전송과 제어를 위해서 유무선 게이트웨이의 내부적 알고리즘을 통해 시간 동기화를 고려해볼 수 있다.

본 논문에서는 이종의 네트워크를 연결하는 유무선 게이트웨이를 위한 동기화 알고리즘을 제안하고, 기존의 동기화 알고리즘과의 비교 분석을 통해 그 장단점을 알아본다.

#### 2. 실시간 유무선 공유 네트워크 동기화 알고리즘

##### 2.1 산업용 유무선 게이트웨이 시간 동기화 문제점 분석

산업용 유무선 게이트웨이의 유선과 무선 프로토콜은 각각 CAN(ISO11898)[3]과 LR-WPAN(802.15.4)[4]을 대상으로 한다. 두 프로토콜은 서로 다른 매체 접속 방식을 가지며 이에 따른 시간 동기화의 문제들이 발생한다. 네트워크의 시간 동기화는 대부분 전송 지연과 로컬클럭 오차로 인한 문제점들을 가진다. 유무선 공유 네트워크는 중간계층으로 유무선 게이트웨이가 사용됨으로 인해 계층 간 전송 지연이 발생한다. CAN은 LR-WPAN에 비해 매체 접속 지연이 작으며, 채널 공유로 인한 시간 참조 요소가 많다. 매체 접속을 위해 이더넷과 같은 CSMA/CD를 이용하며, 실시간적인 전송을 위해 NDMA를 지원한다. 이로 인한 전송의 보장과 빈번한 채널 공유 페이로 인해 모든 노드가 마스터의 시간으로 동기화가 쉽다. LR-WPAN은 매체 접속을 위해 CAP(경쟁접속구간)과 CFP(비경쟁접속구간)을 지원한다. 아래 그림은 LR-WPAN의 공유채널에서의 프로토콜 동작을 보여준다.



〈그림 1〉 LR-WPAN 채널의 지연요소 분석

LR-WPAN은 CAN에 비해 상대적으로 매체 접속 시간이 길고, 전송에 대한 실시간적인 보장이 CFP에 참여하는 7노드까지만 적용된다. 그러므로 CAP에 참여하는 노드는 매체 접속 간격이 커질수록 마스터 노드와 시간 동기화의 오차가 발생한다.

그림 1에서 Delay 부분은 시간 동기화 오차로 인한 채널 효율 감소를 보여준다. 그림에서와 같이 노드의 로컬클럭 오차는 실제의 시간과 노드의 시간차로 전송지연과는 달리 지속적인 누적으로 인해 잘못된 동작을 일으킨다. 또한 전송 보장을 위한 IFS 구간 같은 곳에서 서로 다른 시간에 프로

토콜을 시작하게 함으로써 채널의 효율을 떨어뜨린다.

##### 2.2 실시간 유무선 공유 네트워크 동기화 알고리즘

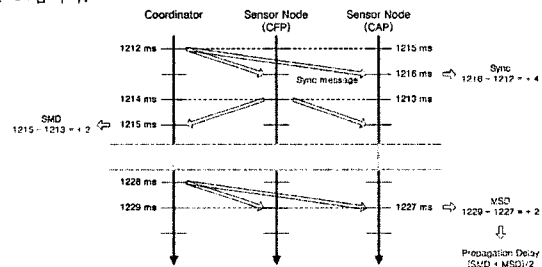
대부분의 기존의 동기화 알고리즘은 산업용 환경의 무선 네트워크에서 실시간적인 효율성이 떨어지므로 실시간성에 대한 보완이 필요하다. 그리고 본 논문에서 적용되는 LR-WPAN의 경우 채널접근을 위해 CAP와 GTS의 두 가지 방식을 가지므로 이에 적합한 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 타임스탬프 교환을 통해 채널 전파 지연을 해결하고, 유무선의 오프셋 연산으로 각 노드의 주파수 오차를 해결한다.

##### 2.2.1 개선된 RBS 알고리즘

타임스탬프를 이용한 알고리즘 중 RBS는 센서네트워크에 적용하기에 적합한 알고리즘으로 LR-WPAN의 경우와 같이 채널 접근이 제한되는 CAP 노드들에 대해 시간 동기화가 적용 가능하다[5]. CAP 노드들은 채널의 접근 없이 가장 가까운 GTS의 방송 신호를 참조함으로써 채널 전파 지연을 계산할 수 있다. 이것은 긴 시간 동안 잠복하는 노드에 대해서도 적용이 가능하다. 개선된 RBS 알고리즘의 동작 시나리오는 다음과 같다.

- (1) 코디네이터는 반복적인 슈퍼프레임의 첫 부분에서 비콘 메시지를 자신의 네트워크 영역에 방송을 하고 이것을 통해 각 노드는 주파수 오차에 의해 지연된 노드의 클럭을 코디네이터와 근사한 값으로 보정한다.
- (2) 참조되는 순차노드가 자신의 타임 스탬프에서 메시지를 코디네이터로 보내기 위해 방송을 하고, 경쟁 접근 노드는 그 메시지를 통해 채널 전송 지연 1을 얻는다.
- (3) 다음 순서의 슈퍼프레임에서 코디네이터가 비콘을 방송하고, 이것으로 채널 전송 지연 2를 얻게 된다.
- (4) 채널 전송지연의 양방향 값을 더하여 평균을 얻고 이것으로 노드 자체의 클럭을 보정한다.

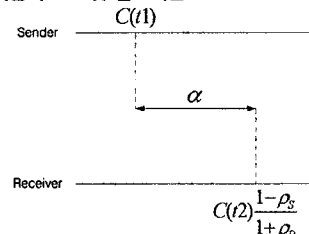
다음의 그림은 RBS의 참조방식을 통한 개선된 전송 지연 동기화를 설명하는 그림이다.



〈그림 2〉 개선된 RBS를 통한 전송 지연 동기화

그림에서와 같이 RBS의 방송 정보 참조 방식을 통해 CAP 노드들이 동기화 된다. CFP 노드와 코디네이터 간의 동기화 정보는 같은 채널을 이용하는 CAP 노드들에게 시간 동기화 정보로 적합하다. 위의 개선된 RBS 알고리즘은 저전력의 센서/구동기 노드에서의 연산 부하가 적은 장점이 있다.

##### 2.2.2 가중치 기반의 오프셋 알고리즘



〈그림 3〉 RBS를 통한 전송 지연 동기화

로컬클럭을 제어하기 위해 본 논문에서는 가중치 기반의 오프셋 알고리즘을 제안한다. 채널 지연을 해결하기 위한 개선된 RBS 동기화 알고리즘으로 평균 채널 전송 지연을 구한다. 평균 채널 전송 지연을 통해 상대 노드와의 주파수 오차를 구하고, 오차의 평균값을 계속 유지시킨다. 이는 장기

적으로 누적되는 주파수 오차를 해결할 수 있다. 그림 3은 마스터 노드(Sender)를 기준으로 슬레이브 노드(Receiver)에서의 주파수 오차를 나타낸다.

슬레이브 노드의 주파수는 마스터를 기준으로 일정한 비율로 나타나며, 이에 따라 가변하는  $\alpha$ 가 존재한다. 특정 시점에서의  $\alpha$ 는 다음과 같이 계산 되어 진다.

$$C(t2) + \alpha = C(t2) \frac{1 - \rho_S}{1 + \rho_R}, \quad \alpha = \frac{-(\rho_S + \rho_R)C(t2)}{1 + \rho_R}$$

$\alpha$ 는 주파수 오차가 일어난 횟수가 되며,  $\rho$ 는 실제 시간에 대한  $C(t2)$ 의 시간 오차 비율이다. 오차 비율을 이용하여  $\alpha$ 를 얻으려면 임의의 주파수에 대한 오차를 계산하여야 되므로 불가능하다. 본 논문에서는  $\alpha$ 를 간단히 구하기 위해서 평균 채널 지연  $E[D_{P_i}]$ 을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$C(t2) + \alpha - C(t1) = E[D_{P_i}] + \alpha$$

평균 채널 지연  $E[D_{P_i}]$ 는 주파수 오차에 영향을 받지 않으므로 지연의 평균값을 구하면 간단히  $\alpha$ 를 구할 수 있다. 하지만 계속해서 변화하는 채널의 상황에서  $E[D_{P_i}]$ 가 변화함으로 적절한 평균값이 필요하다. 최근 지연 값으로 평균 채널 지연을 구하기 위해 다음과 같은 식을 단순 적용하는 것은 이전의 채널 지연의 편차들을 적용하지 못한다.

$$\frac{E[D_P] + D_{P\_Current}}{2}$$

$E[D_{P_i}]$ 가 포함하는 이전의 채널 지연 편차 값을 모두 적용하기 위해서는 평균을 구하기 위해 나누어진 전체 지연 횟수를 곱한다. 다음의 식은 모든 지연 값들에 대한  $E[D_{P_i}]$ 를 구하는 식이다.

$$E[D_P] = \left( \sum_{i=0}^{N-1} D_{P_i} \right) / (N) = \frac{D_{P0} + D_{P1} + D_{P2} + \dots + D_{PN-1}}{N}$$

새로운 채널 전송 지연  $D_{PN}$ 과  $E[D_{P_i}]$ 를 더하여  $N+1$ 로 나누어 주면 새로운  $E[D_{P_i}]$ 를 적용할 수 있다. 하지만 모든  $N$ 에 대한  $E[D_{P_i}]$ 를 계산하는 것은 변화하는 채널의 지연으로의 적용을 느리게 한다. 그러므로 전체  $N$ 에 대한 적용 범위의 적절한 가중치 값  $W$ 가 필요하다.  $W$ 를 이용한 평균을 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\frac{W * E[D_P] + D_{PN}}{W + 1}$$

가중치  $W$ 는 변화하는 채널의 지연을 반영하여야 하므로 노드의 채널 접근까지 지연되는 시간과 데이터 전송 간격을 이용할 수 있다. 채널 접속 빈도가 높은 노드의 경우 전송 간격이 작기 때문에 동기화가 빈번하게 일어나므로 매체 접속에 지연되는 시간만을 고려한다. 경쟁 구간의 노드들은 충돌 회피를 위해 임의의 값을 통해 백오프정를 거치게 되고, 이것으로 채널 접근까지의 지연 정도를 알 수 있다. 다음은 임의의 백오프 값  $BP$ 를 구하는 식이다. 경쟁 노드는 채널 접속 성공까지의 총  $BP$  값을 통해 채널 접근 지연을 알 수 있다.

$$BP = \text{Random}(2^{BE} - 1)$$

$BP$ 는 aUnitBackoffPeriod의 값으로 20 symbols에 해당하며 LR-WPAN은 62.5 Ksymbols/s의 통신 속도로 적용한다. 노드의 기본적인 주파수는 표준에 권장된 32MHz이고 오차 정도는  $\pm 40\text{ppm}$ 이다. 이것을 1Hz 오차에 대한 심볼 수를 구하고,  $BP$ 에 적용하여 1Hz 오차를 가중치 1로 적용한다. 32MHz 동안 총 2560Hz의 최대 오차가 나타날 수 있으며, 1 symbol은 512 Hz에 해당하므로 약 24.414symbols 당 1 Hz의 오차가 생긴다. 이것을 적용하여 다음의 식으로 가중치  $W$ 를 구한다.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N BP_i * 20\text{symbols} * 512}{12500}$$

전송 간격이 큰 노드와 비주기 노드의 경우 긴 시간동안 매체 접속을 하지 않으므로 동기화 간격도 커진다. 그러므로 긴 동기화 간격에 비례한 가중치  $W$ 의 적용이 필요하다. 위의 식에서  $BP_i * \text{symbols}$ 의 값을 동기화 간격의 심볼 개수로 바꾸어 적용한다.

### 3. 모의실험 및 결과 분석

#### 3.1 모의실험 환경

제안된 알고리즘의 적용 가능성을 분석하기 위한 모의실험 환경은 다음과 같다. CAN에서는 Polling(주기노드)과 COS(비주기노드)로 구성하고, LR-WPAN에서는 CAP와 CFP로 구성한다. CFP노드는 주기노드에 해당되고, CAP는 주기노드와 비주기노드로 구분한다.

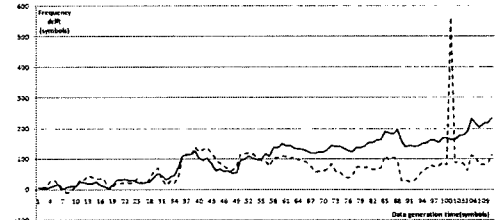
〈표 1〉 유무선 네트워크 구성

CAN node		LR-WPAN node		
Polling	COS	CAP		CFP
		periodic	sporadic	
20	10	10	10	7

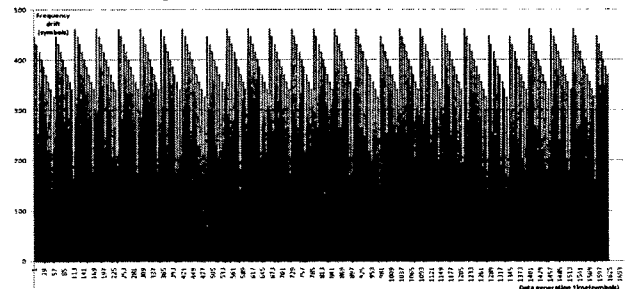
#### 3.2 결과 분석

모의실험에서는 유무선 공유 네트워크 환경에서 유선과 무선노드 간의 데이터 교환시에 발생하는 전송지연을 찾고, 평균전송지연을 통해 무선노드 간의 주파수 오차를 구한다.

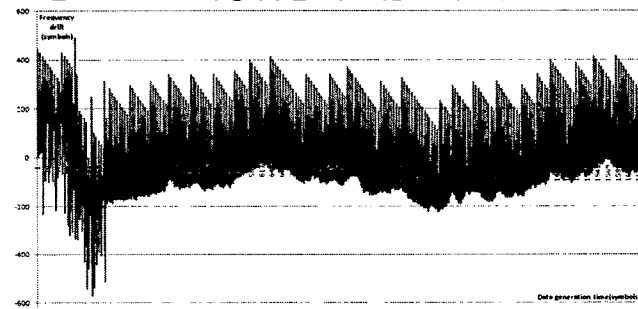
그림 4는 실제시간과 알고리즘을 적용하지 않은 노드의 주파수 오차를 알고리즘 적용된 주파수 오차 값과 비교한 그림이다. 그림 4의 알고리즘 적용된 주파수 오차 값(점선)이 평균전송지연에 따라 적용하며 더 낮은 오차 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 5는 기존의 무선 프로토콜 내부 동기화 알고리즘을 통해 주파수 오차 값을 보정하는 방법이다. 연속적인 주파수 오차 값이 주기를 가지며 증감을 하는 것으로 채널 접속 빈도가 작은 비주기 데이터 발생 노드의 경우 오차 값은 더 크게 발생한다. 그림 6은 알고리즘을 적용하여 긴 시간 동안 노드의 주파수 오차 값을 측정할 것이다. 그림 4에서와 같이 변화하는 네트워크의 상황에 따라 주파수 오차 값을 적용적으로 찾아감을 알 수 있다. 결론적으로, 그림 5와 그림 6을 비교하면, 본 논문의 실시간 동기화 알고리즘 적용으로 더 작은 주파수 오차 값 범위를 유지함을 알 수 있다.



〈그림 4〉 실제시간과 노드의 주파수 오차 값(실선)과 실시간 동기화 알고리즘을 적용하여 구한 노드의 주파수 오차 값(점선)의 비교



〈그림 5〉 LR-WPAN의 동기화 알고리즘 적용으로 구한 주파수 오차 값



〈그림 6〉 실시간 동기화 알고리즘 적용으로 구한 주파수 오차 값

## 4. 결 론

본 논문에서는 이종의 제어 네트워크를 연결하는 유무선 게이트웨이를 위한 동기화 알고리즘을 제안하고, 기존의 알고리즘들과 비교 분석을 통해 적용 가능성을 알아보았다. 모의실험을 통해 제안된 알고리즘이 기존의 동기화 알고리즘에 비해 주파수 오차 값을 감소시켜 각 노드들의 동기화에 더 효율적으로 동작됨을 살펴보았다. 향후 다양한 실험을 통해 채널 효율 증가에 대해 분석하고, 이를 통한 체계적 동기화 알고리즘에 대해 연구를 수행하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Morel, P., Croisier, A., "A wireless gateway for fieldbus", IEEE International Symposium of Wireless: Merging onto the Information Superhighway, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 27-29 Sept, 1995, Page:105 - 109 vol.1
- [2] J. Elson, K. Romer, "Wireless Sensor Networks: A new regime for time synchronization", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 33, Issue 1, January 2003, Pages 149-154
- [3] R. Bosch, CAN Specification 2.0. Postfach, Stuttgart, Germany: Robert Bosch GmbH, 1991.
- [4] IEEE 802.15.4 Standard-2003, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for LR-WPANs", IEEE-SA Standard, 2003.
- [5] J. Elson, L. Girod, D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts", ACM Operating Systems Review, Volume 36, Issue SI, December 2002, Pages 47-163